

ПАНОВ Евгений Иванович

**РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ, ТЕХНОЛОГИИ И
ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
МАЛОПЛАСТИЧНЫХ ЗАЭВТЕКТИЧЕСКИХ СИЛУМИНОВ
МЕТОДОМ ПОПЕРЕЧНО-ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ**

**Специальность 05.03.05 – Технологии и машины
обработки давлением**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Москва – 2006

1776575

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Современное развитие техники все больше требует широкого применения специальных сплавов на основе железа, титана и алюминия. Эти сплавы обладают высокими удельными механическими свойствами, но, как правило, являются труднодеформируемыми материалами, обладают низкой пластичностью, особенно на первых стадиях обработки давлением. Некоторые из этих сплавов, например, заэвтектические силумины с содержанием кремния 17-23%, считались до последнего времени не способными к пластическому деформированию. Поэтому изыскание путей и методов существенного улучшения структуры и повышения пластических свойств труднодеформируемых сплавов на основе алюминия было и есть актуальной и приоритетной задачей расширения сферы применения этих сплавов в авиационной, автомобилестроительной и других отраслях промышленности.

Работами отечественных ученых Целикова А.И., Полухина П.И., Тетерина П.К., Осадчего В.Я., Потапова И.Н., Романцева Б.А., Галкина С.П., Никулина А.Н. и др. показано, что поперечно-винтовая прокатка оказывает существенное положительное влияние на структурообразование металлов и изменение пластических и механических свойств металлов.

Поэтому настоящая диссертация, посвященная дальнейшему исследованию напряженно-деформированного состояния сплошных заготовок при поперечно-винтовой прокатке с применением трехмерного конечно-элементного моделирования этого процесса, разработке оборудования и технологии производства прутков, труб и других изделий из труднодеформируемых сплавов (заэвтектических сплавов) имеет важное научное и практическое значение и является актуальной.

Цель и задачи исследований.

Целью настоящей работы является развитие теоретических, научно-технологических основ и исследование принципиальной возможности и особенностей пластического деформирования малопластичных ($\delta \approx 3\%$) и, поэтому труднодеформируемых, заэвтектических силуминов с содержанием кремния $Si \geq 17-23\%$, достижение многократного повышения их пластических свойств методами ОМД (без изменения химсостава) и возможности изготовления из них изделий и деталей различных форм и конфигураций широкого назначения всеми известными способами ОМД для расширения сферы их применения в отраслях промышленности (авто- и авиапром, нефте- и газодобыча и т.д.) с эффективным использованием их уникальных физико-механических и эксплуатационных свойств.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи.

1. Исследование и анализ технологических процессов ОМД, схем напряженно-деформированного состояния и выбора из всех способов ОМД в качестве базового – способа поперечно-винтовой прокатки (ПВП), отличающегося наиболее сложной схемой напряженно-деформированного состояния, многоциклическостью воздействия рабочих инструментов на исходную структуру заэвтектических силуминов.

2. Исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) сплошной (круглой) заготовки при различных схемах ПВП с применением трехмерного конечно-элементного моделирования для оценки роли и воздействия основных технологических параметров ПВП на изменение НДС, на получаемую структуру и пластические свойства заэвтектических силуминов.

3. Создание необходимого оборудования – универсального стана ПВП, позволяющего работать в широком диапазоне варьирования технологическими параметрами

рами и возможностями, с реализацией возможности работать с различными схемами ПВП и с широким спектром выпускаемой продукции.

4. Выполнение комплекса исследований по изучению реологических свойств, микроструктуры и фазового состава заэвтектических силуминов, определение зависимостей этих характеристик от температурно-скоростных и других параметров процесса ПВП.

5. Научное обоснование технологического процесса поперечно-винтовой прокатки сплошных полуфабрикатов заэвтектических силуминов и определение его параметров для получения гарантированной измельченной структуры, в т.ч. кристаллов кремния, и повышенными (в сравнении со свойствами слитков) пластическими свойствами.

6. Разработка технологии процесса прошивки гильз (труб) из заэвтектических силуминов с высокими показателями геометрии и качества поверхности.

7. Выполнение комплекса исследований по изучению кинематики пластичного сплошного течения металла при ПВП сплошной заготовки заэвтектических силуминов, изучение влияния технологических параметров на механизм структурообразования и пластические свойства прокатываемого металла.

Научная новизна полученных результатов.

1. Впервые реализовано (без изменения химсостава) методом поперечно-винтовой прокатки многократное повышение пластичности заэвтектических силуминов с содержанием кремния 17-23% (повышение относительного удлинения δ с 3% (в слитках) до 11,4% (в катаных прутках)) без снижения их прочностных показателей и, как следствие этого, превращение этого семейства, по сути литейных сплавов, в пластически деформируемые и другими способами ОМД (ковка, штамповка, прошивка и др.), применение которых для деформирования до недавнего времени было невозможно.

2. Впервые выполнено трехмерное конечно-элементное моделирование процесса холодной и горячей поперечно-винтовой прокатки (ПВП) сплошной круглой заготовки различных металлов и сплавов, выполнен сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния металла при его деформировании с различными схемами ПВП (двух-, трех- и четырехвалковые).

Получены картины распределения и величины всех видов напряжений (радиальных, осевых, окружных) по сечениям, а также распределение растягивающих и сжимающих напряжений по зонам их действия.

Изучены зависимости величин всех видов напряжений от применяемых схем ПВП, от видов и величин внешне прилагаемых к заготовке усилий подпора и натяжения, от различных технологических параметров процесса ПВП (угол подачи, степень деформации, передаточное число i и др.).

3. Установлено, что двухвалковая схема ПВП является наиболее опасной с точки зрения вскрытия осевой центральной полости прокатываемой заготовки в сравнении с другими схемами (трех- и четырехвалковой) в связи с наличием одно-временного воздействия следующих факторов:

- значительного превышения (в 2,5-3 раза) максимальных растягивающих нормальных напряжений (особенно радиальных) в центральной зоне заготовки в сравнении с другими схемами;

- сосредоточения строго по оси заготовки (осевая зона) максимальных растягивающих нормальных напряжений;

- одновременного воздействия (совместно с нормальными) на осевую центральную полость (зону) заготовки и касательных напряжений (в отличие от других схем ПВП).

Фактически полученными результатами установлено, что при двухвалковой схеме ПВП металл в осевой зоне находится в состоянии всестороннего растяжения, а разрушение осевой зоны заготовки при двухвалковой схеме носит двойственный характер: как путем отрыва (действие нормальных растягивающих напряжений), так и путем среза (действие касательных напряжений).

4. Установлено, что трехвалковая схема ПВП, благодаря приближению к схеме всестороннего сжатия (большее число рабочих валков при трехвалковой схеме ПВП приближает контур деформации к более полной степени замкнутости) создает благоприятные условия для резкого снижения растягивающих и преобладающее воздействие сжимающих напряжений, что, в свою очередь, приводит к возрастанию пластических свойств заэвтектических силуминов при ПВП.

5. Выполнен сравнительный анализ и установлены принципиальные различия механизмов структурообразования и дробления кристаллов кремния в заэвтектических силуминах при различных способах ОМД (прессование и ПВП), а также определены основные факторы, влияющие на повышение пластических свойств заэвтектических силуминов при деформировании их способом ПВП.

Установлено, что при ПВП, в отличие от прессования, интенсивное дробление кристаллов кремния и получение мелкозернистой структуры происходит при одновременном воздействии знакопеременных действующих видов напряжений и многоциклического характера деформирования заэвтектических силуминов.

Разработана аналитическая зависимость для определения усредненных минимальных размеров кристаллов кремния (частиц дробления) от основных технологических параметров ПВП (угол подачи, степень деформации, число циклов воздействия рабочих валков на заготовку).

Минимальные размеры кристаллов кремния ($A = 15 \div 10$ мкм) достигаются при $\epsilon \geq 32\%$, $\alpha = 9^\circ$, $\dot{\epsilon} = 0,3 \div 0,5$ с⁻¹, с применением трехвалковой схемы ПВП.

6. Установлены основные закономерности пластического послойного течения металла при поперечно-винтовой прокатке в условиях трехосного напряженного состояния, разработана математическая модель кинематики послойного перемещения металла в прокатываемой заготовке.

7. Разработана математическая модель зависимости пластических свойств (δ %) заэвтектических силуминов от основных технологических параметров ПВП (α , ϵ) и размеров кристаллов кремния (A) при деформировании заготовки способом ПВП.

Методы исследования. В работе использован комплексный метод исследований, включающий теоретический анализ и экспериментальное апробирование выбранных решений в производственных и лабораторных условиях.

В настоящей работе были использованы: метод конечных элементов и компьютерного моделирования, метод сравнительного анализа, метод математического планирования и статистической обработки результатов экспериментов при изучении напряженно-деформированного состояния.

При подготовке слитков заэвтектических силуминов для прокатки был использован метод ультразвуковой обработки. При изучении микроструктуры, фазового состава, морфологии и размера частиц различных фаз, изучения субструктуры были использованы: рентгеновский метод, метод сканирования, метод дифрактометрических измерений, микрорентгеноспектральный метод.

При исследовании кинематики послойного перемещения металла при ПВП заэвтекктических силуминов и разработки математической модели использовались штифтовой метод, метод итерационных приближений, метод экстраполяции экспериментальных кривых.

Экспериментальные исследования (прокатка, прошивка) проводились на универсальном стане ПВП 20-60 цеха № 5 ЗЛС ВИЛСа, ОПУ ВИЛСа, лабораторном оборудовании (пластометр) МИСиСа.

Практическая ценность и реализация работы.

1. На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований впервые разработана новая технология пластического деформирования малопластичных заэвтекктических силуминовых сплавов типа 01390, 01391, 01392 с содержанием кремния 17-23 % способом поперечно-винтовой прокатки (трехвалковая схема ПВП), благодаря этой технологии сплавы приобрели свойства пластически деформируемых.

2. Впервые осуществлена ПВП заэвтекктических силуминовых сплавов на стане ПВП 20-60 и определен узкий диапазон основных технологических параметров ПВП (угол подачи $\alpha=9^\circ$, температура нагрева заготовки $T^\circ\text{C} = 470-480^\circ\text{C}$, степень деформации $\varepsilon \geq 32-49\%$, скорость деформации $\dot{\varepsilon} = 0,3 \div 0,5 \text{ с}^{-1}$, схема ПВП – трехвалковая), обеспечивающий получение полуфабрикатов (прутков) с наперед заданной мелкозернистой структурой по всему объему заготовки, в т.ч. с дроблением кристаллов кремния до размеров 10–15 мкм и с многократными повышенными пластическими свойствами (в 3-4 раза в сравнении со свойствами исходных слитков).

3. Разработана технология и впервые осуществлена прошивка гильз (труб) различных типоразмеров $\varnothing 80 \div 75 \times 15 \text{ мм}$, $\varnothing 70 \times 7 \text{ мм}$ и $\varnothing 75 \times 5 \text{ мм}$ методом ПВП (трехвалковая схема) из полуфабрикатов (прутков) с повышенными пластическими свойствами, с высокими показателями по разностенности (не более 1 % по толщине стенки труб), и с высокой коррозионной стойкостью в агрессивных средах (газо- и нефтедобыча).

4. Из полуфабрикатов (прутков и труб), полученных способом ПВП (пп. 2 и 3) и обладающих вновь приобретенными повышенными пластическими свойствами, на оборудовании МГТУ «Станкин» отработана технология изготовления деталей типа «чашка», «диски» сложной конфигурации для автомобилей ВАЗ 32118 методомковки и изотермической штамповки.

5. Из полуфабрикатов с повышенными пластическими свойствами и мелкозернистой структурой, полученных способом ПВП, возможно изготовление износостойких (при повышенных температурах эксплуатации) поршневых пар для двигателей (авиа- и автомобилестроение) методом изотермической штамповки, а также изготовление многих других изделий и деталей практически всеми известными способами ОМД (ковка, штамповка, прессование, прокатка, прошивка и т.п.).

6. Результаты выполненных теоретических и экспериментальных исследований и направленных на повышение пластических и других свойств заэвтекктических силуминовых сплавов использованы в учебном пособии для студентов и научно-технических работников («Справочник по конструкционным материалам» Справочник / Б.А. Арзамасов, Г.В. Соловьева, С.А. Герасимов и др.; 11-й ред. Б.А. Арзамасова, Т.В. Соловьевой. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 640 с.: ил.) в разделе «Материалы с особыми свойствами».

7. Автором настоящей работы разработаны конструктивные основы, а КБ станков криволинейной прокатки ЭЗТМ выполнен рабочий проект, изготовлен в металле и пу-

шен в эксплуатацию (ВИЛС) универсальный стан поперечно-винтовой прокатки ПВП 20-60, имеющий в своем составе одну универсальную рабочую клеть, позволяющую поочередно работать с разными схемами прокатки (двух-, трехвалковую), выполнять полный технологический цикл (прокатка прутков, прошивка гильз, раскатка гильз в трубы, калибровка по диаметру или толщине стенки), производить гладкие изделия и изделия с периодическим профилем и т.д.

Апробация работы. По содержанию диссертационной работы был сделан ряд докладов на научно-технических конференциях различного уровня, в том числе на:

Пятом конгрессе прокатчиков, г. Череповец, 21-24 октября 2003 г.; Второй Международной научно-технической конференции «Технологические процессы в металлургии», г. Рива дель Карда (Италия), 19-21 сентября 2004 г.; Всероссийской научно-технической конференции «Непрерывные процессы обработки давлением», посвященной 100-летию со дня рождения акад. А. И. Целикова, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 14-15 апреля 2004 г.; Международной научно-технической конференции «Теория и технология процессов пластической деформации-2004», г. Москва, МИСиС, 26-27 октября 2004 г.; Научно-технической конференции «Технологические процессы в машино- и приборостроении», г. Москва, МГАПИ, декабрь 2004 г.; Международной научно-технической конференции «Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов», посвященной 90-летию со дня рождения чл.-корр. АН СССР В.С. Смирнова, г. С.-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет, 20-22 сентября 2005 г.; Шестом конгрессе прокатчиков, г. Липецк, ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат», ноябрь 2005 г.; Ученом совете ВИЛСа, май 2002 г. и сентябрь 2006 г.; Научном семинаре кафедры МТ-10 «Оборудование и технология прокатки», МГТУ им. Баумана, ноябрь 2001 г. и июнь 2006 г.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано: результаты исследований в учебном пособии «Справочник по конструкционным материалам» – 1; статей в центральных и зарубежных научных рецензируемых изданиях и сборниках, входящих в «Перечень периодических научных и научно-технических изданий, выпускаемых в РФ, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертации на соискание ученой степени доктора наук» – 32; статей в различных межвузовских и внутривузовских сборниках научно-технических трудов – 10; авторских свидетельств на изобретение и патентов – 5.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, общих выводов по работе, списка использованных источников из 207 наименований, включает 309 страниц машинописного основного текста, содержит 131 рисунок и фотографий, 59 таблиц. Общий объем работы 329 страниц.

Основное содержание работы.

Во введении даны основные пути и научные направления одновременного приобретения различными металлами и сплавами свойств удельной прочности и высокой пластичности, коррозионной стойкости, в том числе: разработка новых композиционных материалов; введение в сплавы элементов в виде вторичных дисперсных выделений (например, Sc - скандия), упрочнение сплавов борволокнами и волокнами карбидов кремния; создание полимерных композиционных материалов на основе углеродных волокон; создание биметаллов, триметаллов и слоистых конструкционных материалов; применение химической и химико-термической обработки сплавов; изыскание новых технологических процессов ОМД.

В настоящей работе кардинальное повышение пластических и некоторое повышение прочностных свойств заэвтектических силуминовых сплавов (при сохранении особых физико-механических их свойств) достигается изысканием новых технологических процессов ОМД, ранее не применяемых для обработки этих сплавов.

ГЛАВА 1. Анализ свойств заэвтектических силуминов, потенциальные возможности их применения и существующие ограничения

В первой главе дается общая характеристика и классификация всех известных алюминиевых сплавов, которые характеризуются высокой удельной прочностью, хорошей способностью сопротивляться инерционным и динамическим нагрузкам, большинство из них имеют прекрасные технологические способности. обрабатываются многими способами ОМД, свариваются, хорошо обрабатываются резанием.

Наилучшими литейными свойствами обладают сплавы $Al - Si$ (силумины). В двойных сплавах $Al - Si$ эвтектика состоит из твердого раствора и кристаллов практически чистого кремния. В легированных силуминах (АК9ч) помимо двойной эвтектики имеются тройные и более сложные эвтектики. В двойных силуминах с увеличением содержания кремния доэвтектического состава снижается пластичность и повышается прочность.

Появление в структуре сплавов крупных кристаллов первичного кремния вызывает снижение и прочности, и пластичности.

В последнее время пристальное внимание привлекают сплавы системы $Al - Si$ с концентрацией кремния значительно выше эвтектической. Эти сплавы называются заэвтектическими, они содержат 17-25 % Si и ряд других легирующих элементов (Cu , Ni , Ti и др.).

Заэвтектические силуминовые сплавы можно рассматривать как естественные композиционные материалы, имеющие двухфазную структуру, состоящую из пластической эвтектической матрицы и хрупких первичных кристаллов кремния размером ≤ 150 мкм, а также кристаллов алюминидов железа, титана и циркония.

Заэвтектические силумины обладают всеми привлекательными свойствами алюминиевых сплавов – малой плотностью при удовлетворительной прочности и высокой коррозионной стойкостью, особенно в среде сероводородов и при испытании на питинговую и общую коррозию в атмосфере, а также на коррозионное растрескивание.

Исследования паспортных характеристик заэвтектических силуминов спл. 01390, 01391, 01392 показали, что эти сплавы не теряют своих прочностных и пластических свойств при пониженных (до $-70^{\circ}C$) и даже, вплоть до криогенных, температурах, что очень важно при эксплуатации, например, труб (если бы стало возможно их изготовление методом ОМД) в условиях Крайнего Севера. Заэвтектические силумины немагнитны, хорошо склеиваются и свариваются методами аргоно-дуговой и точечной сварки.

Структура заэвтектических силуминов с дисперсными включениями первичных кристаллов кремния может обеспечить прекрасную работу на износ, причем, экспериментально установлено, что износостойкость обратно пропорциональна размерам кристаллов кремния.

До недавнего времени изделия из заэвтектических силуминов получали только методами фасонного литья или жидкой штамповки, например, производство поршней двигателей внутреннего сгорания, так как они имеют крайне низкую пластичность вследствие формирования крупных кристаллов первичного кремния, распределенных в матричной структуре сплавов.

Повышенное содержание кремния выше эвтектической точки снижает возможности деформирования, а содержание Si свыше 16-17 % препятствует деформированию этих сплавов любым из способов ОМД.

Известна технология измельчения (модифицирования) избыточных (первичных) кристаллов кремния на стадии литья до размеров, позволяющих повысить пластичность металла слитков за счет введения в шихту небольших добавок фосфора $\leq 0,1$ %.

При этом удалось уменьшить размеры первичных кристаллов кремния до 100 мкм и менее, что позволило получить слитки из заэвтектических силуминов с некоторым увеличением пластичности (относительное удлинение $\delta \leq 2$ %). Однако, такая пластичность заэвтектических силуминов недостаточна даже для того, чтобы получить методом непрерывного литья слиток без трещин.

Для устранения этого явления в ВИЛСе была разработана комплексная модифицирующая обработка потока расплава, включающая введение модификатора лигатурой $Al - Fe - P$ или $Cu - P$ с одновременной ультразвуковой обработкой потока расплава, поступающего в кристаллизатор непрерывного литья. При этом достигнуто измельчение кристаллов кремния до средних размеров 60-50 мкм, а иногда до 40 мкм, повышение пластичности металла слитка (до $\delta \leq 3$ %), обеспечено получение слитков без трещин и даже деформирование их методом прессования.

Тем не менее кардинального измельчения кристаллов кремния при прессовании не происходит и, как следствие этого, рост пластических свойств у прессованных изделий практически отсутствует.

Поэтому необходима более усложненная схема пластического деформирования, которая бы, во-первых, как в случае с прессованием, обеспечивала бы деформирование силуминов по схеме, близкой к схеме всестороннего сжатия, а, во-вторых, обеспечила бы многоцикличность характера прилагаемых к слитку деформирующих усилий с многократным нагружением в очаге деформации и одновременным нарастанием степени деформации по длине очага деформации.

Одновременное сочетание подобных факторов при деформировании заэвтектических силуминовых сплавов должно создать эффект «размалывания» кристаллов кремния и структуры в целом.

Выполнен анализ всех известных методов и способов обработки металлов давлением (ОМД – прессование, волочение, ковка, штамповка, прокатка), который показал, что только поперечно-винтовая прокатка (ПВП) – наиболее близко отвечает всем перечисленным требованиям при деформировании этим способом слитков заэвтектических силуминов.

Задача состоит в том, чтобы носителями всех указанных выше особых специфических физико-механических свойств заэвтектических силуминов были не слитки, а вместо них полуфабрикаты с высокими пластическими и прочностными свойствами, приобретенными благодаря предлагаемой новой технологии, а затем и различные изделия, изготовленные из этих полуфабрикатов с повышенными пластическими свойствами другими способами ОМД (штамповка, ковка, прошивка, прессование и др.).

Иными словами, главная задача состоит в том, чтобы, с целью более широкого внедрения в различные отрасли промышленности изделий из малопластичных труднообрабатываемых заэвтектических силуминовых сплавов, изыскать пути и методы кардинального повышения пластических их свойств с помощью поперечно-винтовой прокатки (ПВП).

Все исследования, направленные на достижение поставленной цели, проводились на универсальном стане поперечно-винтовой прокатки ПВП 20-60, конструктивные основы и принципы универсальности разработаны автором работы, а реализованы в металле КБ станок кривой прокатки ЭЗТМ.

ГЛАВА 2. Разработка и создание универсального стана поперечно-винтовой прокатки ПВП 20-60

Широко применяемые станы поперечно-винтовой прокатки (как прошивные, так и раскатные) в черной и цветной металлургии конструктивно исполнялись всегда таким образом, что каждый из них (рабочая клеть) могли работать только по одной из двух известных схем прокатки: двух- или трехвалковой. Каждый из станов ПВП при этом выполнял только одну операцию (прошивка, раскатка, калибровка).

При выполнении эскизно-технического проекта универсального стана поперечно-винтовой прокатки ПВП 20-60, автором настоящей работы были заложены следующие признаки его универсальности:

- возможность поочередной работы стана с различными схемами прокатки (двух-, трех- и четырехвалковые), которая реализована благодаря разработке оригинальной конструкции универсальной рабочей клетки, выполненной в трех вариантах (рис. 1). Каждый вариант конструкции защищен авторскими свидетельствами на изобретения;
- возможность реализации принципа законченности полного технологического процесса для производства полых изделий (гильз, труб), включающего в себя следующие операции: прокатку сплошных заготовок (прутков); прошивку прутков в гильзы, используя при этом двух- или трехвалковую схему; раскатку гильз в трубы; калибровку труб как по наружному диаметру, так и по толщине труб;
- возможность производства как гладких (сплошных и полых), так и изделий периодического профиля (прутки и трубы), как по внешнему, так и внутреннему диаметру;
- возможность работы универсального стана ПВП 20-60 с различными типами рабочих валков: бочкообразных, дисковых и грибовидных для выполнения различных операций, благодаря конструктивному единообразию кассетного исполнения подушек всех видов рабочих валков;

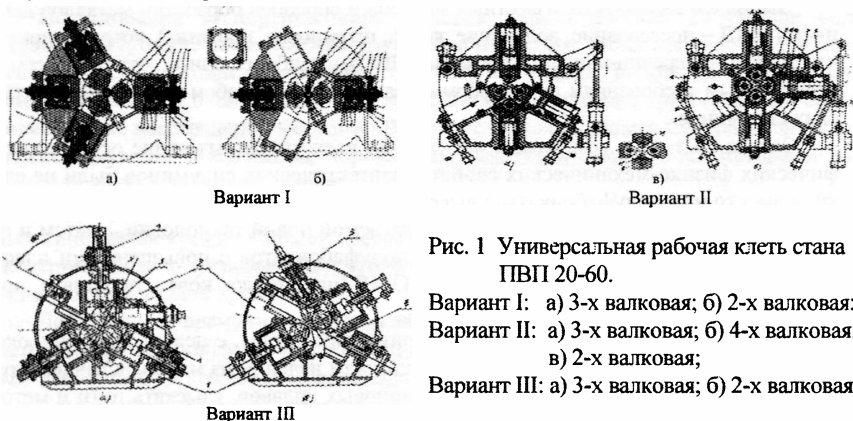


Рис. 1 Универсальная рабочая клетка стана
ПВП 20-60.

Вариант I: а) 3-х валковая; б) 2-х валковая;

Вариант II: а) 3-х валковая; б) 4-х валковая;
в) 2-х валковая;

Вариант III: а) 3-х валковая; б) 2-х валковая

- возможность изготовления на универсальном стане ПВП 20-60 большой номенклатуры изделий широкого диапазона назначения, т.н. изделий машиностроительного назначения (штифтов и втулок, изделий с винтовой и резьбовой поверхностью, червячных пар, шаров и шарикоподшипников, ребристых труб и т.п.).

Эта возможность реализуется, благодаря поочередному применению двух- и трехвалковой схем ПВП и рабочим валкам со специальной калибровкой для каждого типа изделий в отдельности.

Разработаны конструкции основных технологических механизмов и узлов линии стана ПВП 20-60, позволяющие работать стану в различных режимах:

- в режиме прокатки сплошных тел вращения;
- в режиме прошивки сплошных тел в гильзы;
- в режиме раскатки предварительно прошитых гильз в трубы;
- в режиме прокатки изделий периодического профиля с изменением диаметра (наружного и внутреннего для полых тел) по длине изделий;
- в режиме редуцирования или калибровки.

Для сокращения времени на переналадку от одной на другие схемы прокатки предложена кассетная конструкция крепления рабочего валка, которая одновременно служит и гидроцилиндром. Таким образом обеспечивается сведение и разведение рабочих валков в процессе прокатки для производства изделий периодического профиля согласно заданной программе.

Помимо вышеизложенного, выполнен анализ созданных ВНИИМЕТМАШем в 1960-80 гг. специальных станов поперечно-винтовой прокатки, предназначенных для изготовления изделий машиностроительного назначения широкой номенклатуры (штифтов, втулок, изделий с винтовой и резьбовой поверхностью, червячных пар, шаров и шарикоподшипников).

В работе рассмотрены технологические, технические и конструктивные особенности каждого из технологических процессов производства указанных видов продукции. Ранее для изготовления каждого вида продукции создавался отдельный специальный стан поперечно-винтовой прокатки, работающий только по одной схеме прокатки: или двухвалковой, или трехвалковой, в зависимости от своего назначения.

По результатам исследования и сопоставительного анализа сделаны следующие выводы:

- конструкция универсальной клетки стана ПВП 20-60 способна (помимо технологических возможностей, указанных выше) обеспечить реализацию технологических процессов по изготовлению большинства изделий специального машиностроительного назначения с использованием обеих схем прокатки (двух- или трехвалковой) при условии наличия специальных профилированных рабочих валков для каждого техпроцесса;

- размеры инструментов (диаметр рабочих валков, длина бочки валков), частота вращения рабочих валков, углы подачи и раскатки, используемых при изготовлении изделий специального машиностроительного назначения не превышают паспортных технологических возможностей, заложенных в универсальную рабочую клетку стана ПВП 20-60;

- энергосиловые параметры (мощности прокатки, крутящие моменты, усилия на рабочие валки) при прокатке изделий специального машиностроительного назначения значительно ниже паспортных данных универсального стана ПВП 20-60, что говорит о конструкторской, технической и технологической возможностях ра-

бочей клетки стана ПВП 20-60 выполнять указанные виды прокаток с поочередным использованием различных схем обработки (двух- и трехвалковой).

ГЛАВА 3. Исследование напряженно-деформированного состояния сплошной заготовки при поперечно-винтовой прокатке

Решение главной задачи настоящей работы – многократное повышение пластических свойств малопластичных, труднодеформируемых заэвтектических силуминовых сплавов способом ПВП – невозможно без дополнительного, более глубокого изучения напряженно-деформированного состояния сплошной заготовки, обрабатываемой с использованием различных схем ПВП (двух-, трех- и четырехвалковые), изучения их особенностей и различий, и выбора из этих схем ПВП наиболее оптимальной, для достижения необходимых результатов.

Для этого, впервые было выполнено трехмерное конечно-элементное моделирование процесса поперечно-винтовой прокатки сплошной заготовки с использованием метода конечных элементов (МКЭ), современных информационных технологий. вычислительных ресурсов персональных компьютеров (ПК) и конечно-элементного пакета анализа ANSYS, используемого в научно-исследовательских работах и учебном процессе на кафедре «Оборудование и технология прокатки» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В качестве прообраза (прототипа) для трехмерного конечно-элементного моделирования процесса ПВП была использована универсальная рабочая клеть стана ПВП 20-60, способная поочередно работать с различными схемами ПВП (двух-, трех- и четырехвалковые) при одинаковых технологических и конструктивных условиях.

Целью исследования является сопоставительный анализ напряженно-деформированного состояния сплошной заготовки и энергетических параметров процесса ПВП для различных схем прокатки (двух-, трех- и четырехвалковые).

При этом было выполнено:

- моделирование холодной ПВП сплошной цилиндрической заготовки (в качестве эталонного материала – медь М0, по своим свойствам занимающего промежуточное положение между цветными и черными металлами (двух-, трех- и четырехвалковые схемы ПВП);
- моделирование процесса горячей ПВП сплошных заготовок из различных цветных и черных металлов (АД31, медь М0, Ст.20), применяемые схемы ПВП (двух- и трехвалковые схемы ПВП);
- моделирование процесса горячей ПВП сплошной заготовки из заэвтектического силумина спл. 01390 (трехвалковая схема ПВП).

Решение задачи пластического деформирования физического тела, находящегося под внешними силовыми нагрузками (или деформациями) основано на совместном решении уравнений равновесия, несжимаемости материала и условий пластичности при учете соответствующих граничных условий.

Условие пластического перехода может быть представлено в виде поверхности эллипсоида, главные оси которого увеличиваются в результате упрочнения материала.

Моделирование процесса холодной ПВП.

Холодная поперечно-винтовая прокатка сплошной цилиндрической заготовки моделировалась с начального диаметра $D = 120$ мм на конечный диаметр $d = 90$ мм при двух- и трехвалковой схемах прокатки для следующих случаев (вариантов):

1. Прокатка с задним подпором. Сила подпора в соответствии с технической характеристикой стана ПВП 20-60 была принята $T_b = 120 \text{ кН}$.

2. Прокатка с передним натяжением. Сила натяжения в соответствии с характеристикой стана – $T_f = 80 \text{ кН}$.

3. Прокатка одновременно с подпором $T_b = 120 \text{ кН}$ и натяжением $T_f = 80 \text{ кН}$.

Материал заготовки – медь М0. Механические характеристики материала: предел текучести $\sigma_T = 120 \text{ МПа}$, модуль упругости 1-го рода $E = 10^5 \text{ МПа}$, коэффициент Пуассона $\gamma = 0,31$, плотность $\rho = 8100 \text{ кг/м}^3$.

При рассмотрении пластической деформации принята билинейная изотропная характеристика упрочнения материала заготовки.

Модуль упрочнения принят $E_\gamma = 50 \text{ МПа}$, а коэффициент трения в контакте «заготовка-валок» принят равным $\mu = 0,2$. Прокатка ведется в валках с безгребневой калибровкой, устанавливаемых без тангенциального смещения. Угол раскатки в расчетах был принят равным 0° , угол подачи – 6° , 9° и 12° .

Осевое перемещение заготовки обеспечивалось приложением сил трения в контакте и сил с ее торцов, при этом рассматривались варианты перемещения заготовки посредством «подпора», «натяжения» и комбинированного воздействия, а также при их отсутствии.

Основные допущения. Моделирование процесса поперечно-винтовой прокатки проводилось в среде конечно-элементного пакета ANSYS 5.6.2 со следующими допущениями:

- разогрев деформируемого материала и рабочих валков не рассматривается (изотермические условия деформации);

- прокатка считается холодной (температура металла ниже температуры рекристаллизации) и принимается, что сопротивление деформации не зависит от скорости деформации;

- принимается, что трение по всей поверхности контакта с рабочими валками подчиняется закону сухого трения Кулона, причем коэффициент трения постоянен по всей контактной поверхности;

- рабочие валки прокатного стана рассматриваются как абсолютно жесткие тела;

- для обеспечения гарантированного захвата заготовки рабочими валками передняя ее (заготовки) часть выполнена конической.

Конечно-элементные модели процессов и граничные условия, принятые в расчете.

Для создания условий деформирования было введено математическое описание конфигураций прокатываемой заготовки и деформирующего инструмента – валков, как для двух-, так и для трехвалковой схемы, а также взаимное их расположение, обеспечивающее радиальную деформацию.

Модель заготовки формируется из трехмерных твердотельных гексаэдрических элементов с упруго-пластическими свойствами. Прокатные рабочие валки моделируются абсолютно жесткими оболоченными элементами, расположенными на наружных поверхностях валков, контактирующих с прокатываемым металлом. Общее число конечных элементов в трехвалковой модели – 3456, число узлов – 3953. Двухвалковая модель состоит, соответственно, из 3096 элементов и 3563 узлов (рис. 2).

Независимой переменной в модели является время, изменяющееся в процессе решения от 0 до t с некоторым малым шагом интегрирования dt .

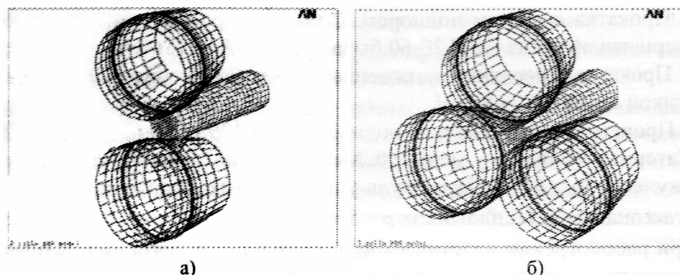


Рис. 2 Исходные конечно-элементные модели процесса поперечно-винтовой прокатки в двух (а) и трех (б) валках

Усилия подпора T_b и натяжения T_f прикладываются в виде распределенной нагрузки к узлам конечно-элементной сетки, расположенным на поверхностях заднего и переднего торцов заготовки соответственно.

Расчеты выполнялись на ПК с процессором Pentium-IV/2400 с объемом оперативной памяти 512 Мбайт, в среде операционной системы Windows 2000.

Обработка результатов моделирования выполнена с помощью постпроцессора ANSYS.

Результаты представлены в виде цветовых полей распределения напряжений и деформаций по поверхности и во внутренних сечениях заготовки для различных моментов времени.

Моделирование процесса горячей поперечно-винтовой прокатки сплошной заготовки методом конечных элементов.

Тепловой режим является одним из основных технологических факторов процесса горячей прокатки, при которой характер течения металла связан с изменением сопротивления деформации по сечению заготовки, зависящим от распределения температуры в заготовке.

Температурное поле существенно зависит от тепловыделения, обусловленного работой пластической деформации, величиной трения в контакте металла с инструментом (рабочим валком) и определяется полем скоростей деформации. В связи с этим необходимо решать т.н. связанную задачу, учитывающую взаимосвязь механических и температурных процессов. Характерные для горячей прокатки большие пластические деформации, связанность тепловых и деформационных процессов, высокая нелинейность механических и теплофизических свойств металла обуславливают сложность моделирования процесса.

Исследование проводилось на трехмерной конечно-элементной модели процесса в среде пакета МКЭ-анализа ANSYS/LS-DYNA. При моделировании исследовались процессы захвата и установившегося процесса горячей прокатки сплошной заготовки с $\varnothing 120$ мм на $\varnothing 90$ мм в двух и трех валках. Материал валков – сталь 40Х, материалы заготовок – медь М0, АД31, ст.20, заэвтектический силумин 01390.

Учитывалась зависимость механических параметров материалов заготовки и валков от температуры.

При моделировании процесса горячей ПВП решались краевые задачи теории теплопроводности с использованием уравнения теплопроводности для движущейся сплошной среды.

В результате исследования напряженно-деформированного состояния с помощью применения трехмерного конечно-элементного моделирования ПВП сплошной заготовки получены следующие результаты.

Выделены все составляющие компоненты напряженно-деформированного состояния металла (сплошной заготовки) методом ПВП (т.е. радиальные, осевые, окружные, касательные напряжения), получены картины распределения всех видов напряжений для всех схем ПВП (двух-, трех- и четырехвалковая) и абсолютные величины этих напряжений по сечениям (поперечное, продольное и на поверхности заготовки), а также распределение растягивающих напряжений и напряжения сжатия по зонам прокатываемой заготовки в цветовом исполнении.

Картины распределения всех видов нормальных напряжений (радиальных, осевых, окружных) в поперечном сечении заготовки для всех схем ПВП состоят из трех ярко выраженных зон: зона максимальных по величине напряжений сжатия (участки контакта рабочих валков с заготовкой), осевая зона заготовки – зона действия максимальных растягивающих напряжений (это в большей степени относится к радиальным и осевым напряжениям); зона, свободная от контакта рабочих валков с заготовкой, состоящая из двух, трех или четырех участков (в зависимости от количества рабочих валков в схеме ПВП), представляющих по форме сектор, ограниченный длиной дуги между валками и двумя радиусами.

Установлено, что при двухвалковой схеме ПВП абсолютные величины всех растягивающих нормальных напряжений (радиальных, осевых, окружных) превосходят величины аналогичных напряжений при других схемах ПВП. Осевая зона заготовки находится под действием всестороннего растяжения всех напряжений.

При двухвалковой схеме максимальные растягивающие радиальные напряжения сосредоточены строго по оси заготовки, тогда как при трехвалковой схеме эти растягивающие напряжения более равномерно распределены по всему продольному сечению, а по абсолютной величине они в 2,5-3 раза меньше, чем при двухвалковой схеме.

Помимо этого, осевая зона заготовки при двухвалковой схеме ПВП всегда находится под действием и касательных напряжений (в отличие от трех- и четырехвалковой схем), как бы разрывая осевую зону и все сечение заготовки на два симметричных участка.

Поэтому, двухвалковая схема является наиболее опасной (в сравнении с трех- и четырехвалковыми схемами) с точки зрения вскрытия осевой центральной полости прокатываемой заготовки в связи с одновременным действием в этой зоне всех максимальных растягивающих напряжений, а также и дополнительным воздействием касательных напряжений.

Получены сравнительные результаты распределения эквивалентной деформации ε_{ep} в поперечном сечении сплошной заготовки при двух- и трехвалковой схемах ПВП.

Результаты исследования показали, что прокатка при трехвалковой схеме ПВП обеспечивает большую суммарную пластическую деформацию заготовки.

Установлено, что стесненное уширение заготовки при трехвалковой схеме способствует равномерному проникновению пластической деформации по сечению заготовки в очаге деформации (по всему сечению $\varepsilon_{ep} = 0,4$). При прокатке по двухвалковой схеме поверхностные слои деформируются более интенсивно, чем внутренние (на поверхности $\varepsilon_{ep} = 0,36$, а в центре заготовки $\varepsilon_{ep} = 0,26$).

Результаты исследований показаны на соответствующих графиках.

Экспериментально доказано, что угол подачи является одним из важнейших технологических факторов, существенно влияющим на величины всех нормальных напряжений (радиальных, осевых и окружных). Полученные экспериментальные данные и зависимости величин напряжений от углов подачи при различных схемах ПВП подтверждают выводы проф. С.П. Галкина (МИСиС) о значимости углов подачи в процессах ПВП в качестве важнейшего и определяющего технологического фактора.

Установлено, что величины касательных напряжений, наоборот, практически не зависят от технологических факторов, в т.ч. и от углов подачи, а зависят только от схемы ПВП. Максимальных величин касательные напряжения достигают при двухвальной схеме.

Исследована зависимость влияния степени деформации (ε %) на величины видов напряжений, возникающих в заготовке (спл. 01390) при горячей трехвальной схеме ПВП ($T^0C = 480^0C$, $\alpha = 9^0$, $D_0 = \varnothing 300$ мм) (табл. 1).

Исследованы величины всех видов напряжений (растягивающих и сжатия), возникающих в сплошных заготовках из различных металлов (цветных и черных) при горячей прокатке с различными схемами ПВП, а также соотношения величин растягивающих напряжений при двухвальной и трехвальной схемах.

Таблица 1

Зависимость напряжений от степени деформации (ε %)
(сплав 01390, горячая прокатка, $\alpha = 90$, $T^0C = 480^0C$, $D_0 = \varnothing 300$ мм)

Сплав 01390, исходная заготовка $\varnothing 112$ мм.	Радиальные напряжения (МПа)		Осевые напряжения (МПа)		Окружные напряжения (МПа)		Касательные напряжения τ (МПа)
	$\sigma_{r\text{ сжат}}$ (-)	$\sigma_{r\text{ раст}}$	$\sigma_{z\text{ сжат}}$ (-)	$\sigma_{z\text{ раст}}$	$\sigma_{\theta\text{ сжат}}$ (-)	$\sigma_{\theta\text{ раст}}$	
$\varnothing 112 \rightarrow \varnothing 90$ мм ($\varepsilon = 32$ %)	-251,42	37,99	-264,87	94,65	-342,98	85,81	83,2
$\varnothing 112 \rightarrow \varnothing 80$ мм ($\varepsilon = 50$ %)	-307,445	80,251	-232,29	137,03	-333,22	123,92	93,56

Сравнительный анализ полученных величин основных энергосиловых параметров показал следующее:

- сила прокатки при установившемся процессе с трехвальной схемой ПВП в 2 раза ниже, чем при двухвальной схеме;
- полная потребляемая мощность ПВП при трехвальной схеме в 1,5 раза ниже, чем при двухвальной схеме;
- наименее энергоемким процессом ПВП является трехвальная схема с натяжением.

Применение метода трехмерного конечно-элементного моделирования процесса ПВП позволило обосновать решение о выборе трехвальной схемы ПВП и угла подачи $\alpha = 9^0$ для осуществления прокатки заэвтектических силуминов.

ГЛАВА 4. Экспериментальные исследования и технологические особенности деформирования сплошных изделий (полуфабрикатов) из заэвтектических силуминовых сплавов (01390, 01391, 01392) методом ПВП с целью повышения их пластических свойств

Для отработки технологического процесса прокатки слитков из силуминовых сплавов 01390, 01391, 01392 методом ПВП в прутки (полуфабрикаты) с повышенными пластическими свойствами, необходимо знать и другие технологические параметры, в частности, температурно-скоростные, этого процесса, которые, в первую очередь, обеспечили бы стабильность протекания процесса деформирования слит-

ков методом ПВП, а, во-вторых, обеспечили бы полное и максимальное дробление всех структурных компонентов сплава (в т.ч. кристаллов кремния) и, как следствие этого, обеспечили значительное повышение пластических, а если возможно, то и прочностных свойств полуфабрикатов, прокатанных из слитков.

В целях более глубокого изучения технологических возможностей этих сплавов и определения оптимального температурно-скоростного диапазона, выполнены реологические исследования (изучение способности реагировать на температурно-скоростные условия деформации) модифицированных слитков при растяжении, т.е. установлены механические характеристики в зависимости от скорости и температуры деформации.

Исследования и обработка результатов испытаний проводилась при температурах 20, 300, 350, 450 и 500°C при скоростях деформации $\dot{\epsilon} = 0,05; 0,03$ и $0,3 \text{ с}^{-1}$ (по три образца на каждую характеристику). Результаты испытаний даны в табл. 2.

Оптимальными температурами деформации при ПВП следует считать диапазон от 450 до 500°C, при котором пластичность растет, а прочностные свойства монотонно падают (рис. 3).

В результате исследований получено семейство пластометрических кривых сопротивления деформации (σ_s) в зависимости от температуры испытаний в диапазоне (350–475°C) и скорости деформации $\dot{\epsilon}$ в диапазоне 0,1; 0,5; 2,5 с^{-1} в координатах $\sigma_s - \epsilon$ (рис. 4).

Таблица 2

Влияние скорости деформации и температуры испытаний на механические свойства при растяжении гомогенизированного слитка сплава 01390

T, °C	Предел прочности, МПа			Предел текучести, МПа			Относительное удлинение, %			Относительное сужение, %		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
20	185,5	174,5	-	143,5	152	-	4,6	3,2	-	7,3	4,1	-
300	80,5	97	105,5	67	68	74	12,2	12,4	6	18,7	15	7,4
350	48,5	74	81,5	36	51	56	16	19,6	17,2	29,6	26,1	20,1
400	31	55,5	60,5	2,5	36	39,5	17,6	32,6	27,6	37,1	36	30,6
450	21	43	47,5	18	31	35	28	32	22,4	47,5	34,3	27
500	20	28,5	38	-	24,5	30,5	24,5	38,2	32,2	52	50,2	43,2

Примечание: Скорости деформации: 1 – 0,005 с^{-1} ; 2 – 0,03 с^{-1} ; 3 – 0,3 с^{-1}

Анализ кривых (рис. 4) позволяет сделать вывод о том, что, начиная с $\epsilon = 20\%$ идет постепенное увеличение сопротивления деформации σ_s , вплоть до $\epsilon = 40\div 50\%$, после чего кривые выходят на плато.

Помимо этого, в результате пластометрических испытаний была рассчитана величина предельной пластичности λ_p слитков сплава 01390 (рис. 5).

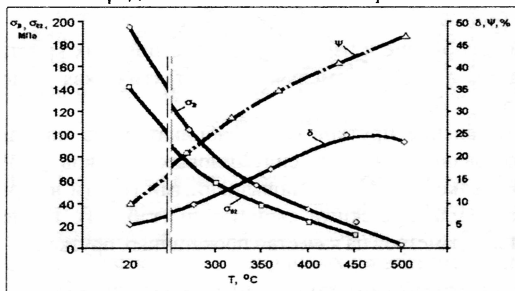


Рис. 3 Зависимость прочностных и пластических свойств слитков сплава 01390 от температуры °C нагрева при испытании их на растяжение

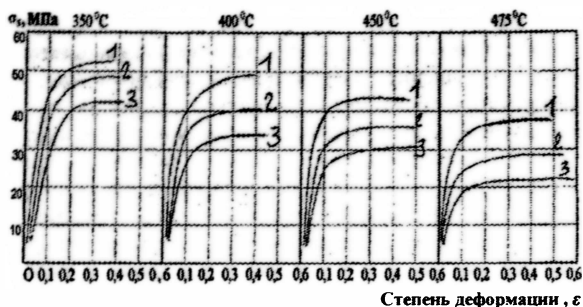


Рис. 4 Кривые сопротивления деформации сплава 01390 при различных скоростях деформации. где: 1 – скорость деформации $2,5 \text{ с}^{-1}$; 2 – скорость деформации $0,5 \text{ с}^{-1}$; 3 – скорость деформации $0,1 \text{ с}^{-1}$

Как следует из данных (рис. 4) повышение скорости деформации с $0,1$ до $2,5 \text{ с}^{-1}$ ведет к понижению предельной пластичности. Наибольшее значение предела пластичности достигается при $T^{\circ}\text{C} = 450^{\circ}\text{C}$ для скорости деформации $\dot{\epsilon} = 0,1 \text{ с}^{-1}$. Именно это обстоятельство (наряду с реологией сплава при испытаниях на растяжение) позволило достаточно точно выбрать температурно-скоростные параметры ПВП.

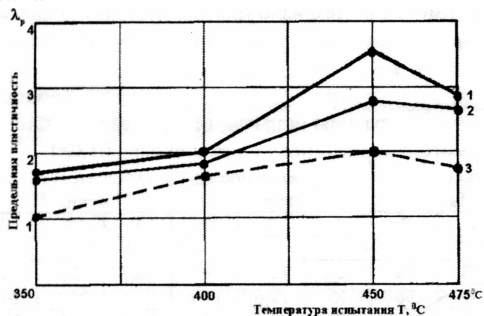


Рис. 5 Зависимость предельной пластичности слитков сплава 01390 от температурно-скоростных параметров при испытании их на кручение: 1 – скорость деформации $0,1 \text{ с}^{-1}$; 2 – скорость деформации $0,5 \text{ с}^{-1}$; 3 – скорость деформации $2,5 \text{ с}^{-1}$

Применение трехвалковой схемы ПВП слитков заэвтектических силуминов позволяет, независимо от шихтовой основы сплавов и предварительного комплексного модифицирования расплава, кардинально измельчить размеры кристаллов первичного кремния.

Проведены исследования по изучению влияния степени деформации при ПВП на структуру и размеры кристаллов кремния (табл. 3 и рис. 6).

Исследованиями установлено, что при ПВП со степенью деформации свыше $\epsilon \geq 32\%$ (прутки диаметром менее $\varnothing 92 \text{ мм}$) размеры кристаллов кремния становятся, в основном, равными $10\text{--}15 \text{ мкм}$ (рис. 6).

В процессе ПВП происходит дробление и измельчение пластинчатых кристаллов алюминидов (железа, титана), а также измельчается эвтектическая основа сплава с $10\text{--}7,5 \text{ мкм}$ до $2,5 \text{ мкм}$ (рис. 7-б).

Впервые осуществлено изготовление прутков (полуфабрикатов) из малопластичных труднодеформируемых заэвтектических силуминовых сплавов 01390, 01391, 01392 методом ПВП (трехвалковая схема) с повышенными (почти в 4 раза выше, по сравнению со слитками) пластическими свойствами (табл. 4). Изучено влияние основных технологических параметров на качество прокатанных прутков.

Влияние степени деформации при ПВП на размеры кристаллов первичного кремния в прутках сплавов 01390 и 01391

Сплав	Вид заготовки	Диаметр слитка/прутка, мм	Степень деформации, %	Средний размер кристаллов Si, мкм
01390	слиток*	100	-	до 30
	пруток	70	51	15
	«»	60	64	15
	слиток**	100	-	до 20
	пруток	70	51	10
01391	пруток	60	64	10
	слиток*	100	-	до 40
	пруток	60	64	15
	слиток**	100	-	до 30
	пруток	70	51	10

* слиток получен без модифицирования;

** слиток получен после комплексного модифицирования

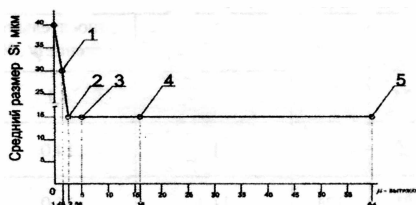
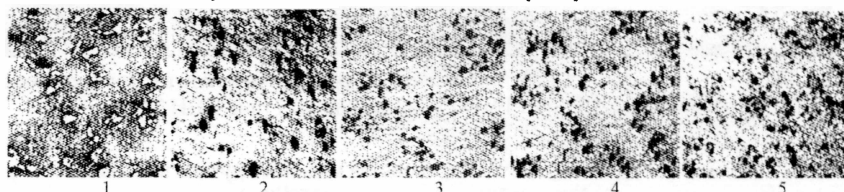
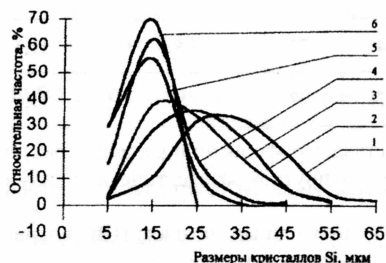
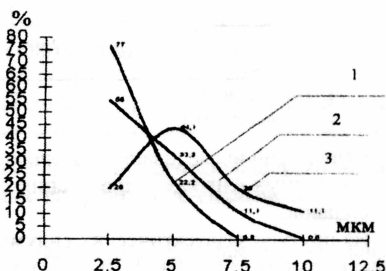


Рис. 6 Микроструктура (x100) и диаграмма изменения средних размеров первичного кремния в структуре слитка и прутков сплава 01390 diam. 92-14 мм после ПВП с разным коэффициентом вытяжки (μ): 1 – 1,48; 2 – 2,56; 3 – 5,01; 4 – 16; 5 – 64.

Фото: 1-слиток diam. 114 мм; 2-diam. 92 мм; 3-diam. 70 мм; 4-diam. 50 мм; 5-diam. 14 мм



а)



б)

Рис. 7 Семейство кривых распределения по размерам кристаллов кремния в слитке ($\varnothing 112$ мм) и прутках различного диаметра, где: а – гистограммы первичных кристаллов кремния (1 – слиток; 2-6 – прутки диаметром $\varnothing 92 \div \varnothing 14$ мм); б – гистограммы вторичных (эвтектических) кристаллов кремния (1 – пруток $\varnothing 14$ мм; 2 – пруток $\varnothing 70$ мм; 3 – слиток $\varnothing 112$ мм)

ПВП с режимами прокатки, соответствующим результатам трехмерного конечно-элементного моделирования и реологических исследований. т.е. трехвалковая схема ПВП. угол подачи $\alpha = 9^\circ$, $T^\circ C = 470-480^\circ C$ и степени деформации $\varepsilon \geq 32\%$ позволяет получать прутки с хорошим качеством, поверхности с мелкозернистой и плотной структурой без рыхлостей в центральной зоне и в концентрических слоях (рис. 8).

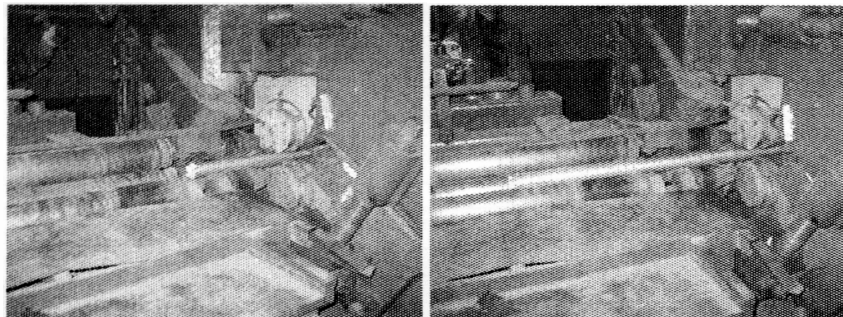


Рис. 8 Рабочие моменты поперечно-винтовой прокатки прутков из заэвтекктических сплавов 01390 и 01391 на универсальном стане ПВП 20-60

Таблица 4

Влияние ПВП на механические свойства катаных прутков из сплавов 01390 и 01391 после отжига ($350^\circ C$, 3 ч.)

Сплав	Полуфабрикат	Степень деформации, %	σ_B , МПа	σ_{02} , МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %
01390	Литая заготовка диам. 100 мм	-	174	152	3,2	4,1
	Пруток диам. 70 мм после ПВП	51	180	122	11,0	14,0
	Пруток диам. 60 мм после ПВП	64	181	124	11,4	16,0
01391	Литая заготовка диам. 100 мм	-	150	90	1,6	10,2
	Пруток диам. 70 мм после ПВП	51	148	134	3,5	15,3
	Пруток диам. 60 мм после ПВП	64	171	137	4,0	15,6

Выполнено исследование фазового состава, морфологии и размеров различных фаз в исходных слитках и прокатанных из них прутков заэвтекктических силуминовых сплавов.

Из прутков заэвтекктических силуминов, полученных методом ПВП впервые на универсальном стане ПВП 20-60 успешно осуществлена прошивка различных типоразмеров гильз $\varnothing 80 \div \varnothing 75 \times 15$ мм, $\varnothing 70 \times 7$ мм и $\varnothing 75 \times 5$ мм (рис. 9).

Из прутков $\varnothing 92$ мм и гильз (трубной заготовки $\varnothing 80 \times 15$ мм) (спл. 01390 и 01392), изготовленных на стане ПВП 20-60, на кафедре СПД МГТУ «Станкин» под руководством проф. А.Э. Артеса была освоена технология горячейковки и объемной штамповки деталей сложной конфигурации типа «диск» и «чашка» (рис. 10).

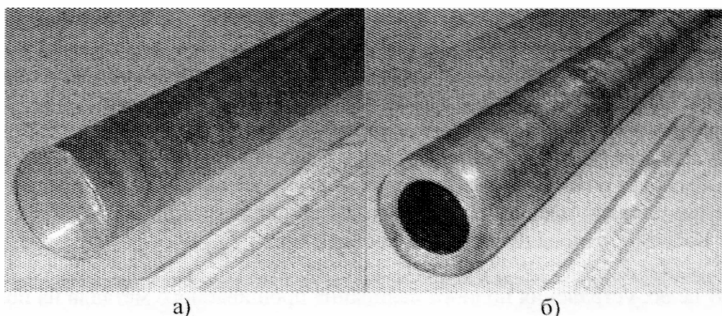


Рис. 9 Изделия, полученные методом ПВП из слитка $\varnothing 112$ мм (спл. 01390, 01392) на стане ПВП 20-60:

а – пруток $\varnothing 80$ мм (заготовка) (трехвалковая схема);

б – гильза, прошивная из прутка $\varnothing 80 \times 15$ мм на стане ПВП 20-60 (трехвалковая схема)

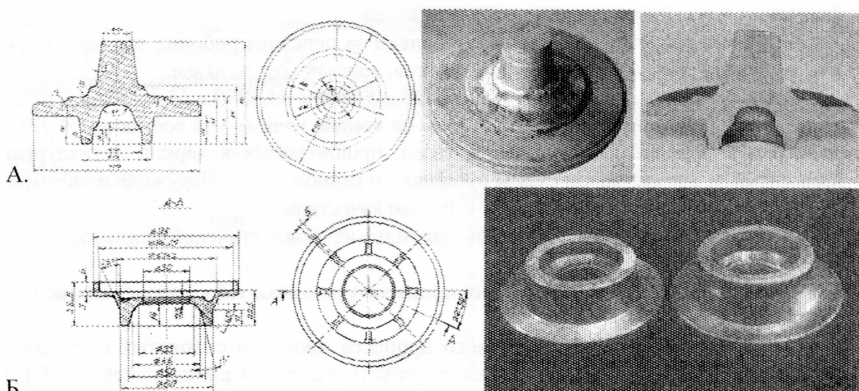


Рис. 10 Изделия, полученные из катаных полуфабрикатов ПВП для автомобиля ВАЗ 32118 (стан ПВП 20-60), где:

А – штампованный «диск» из прутка $\varnothing 92$, спл. 01392;

Б – поковка типа «чашка» из гильз $\varnothing 80 \times 15$ мм, спл. 01392

ГЛАВА 5. Исследование, освоение и особенности процесса прошивки гильз из заэвтектических силуминовых сплавов

В настоящей главе рассмотрены особенности технологического процесса прошивки гильз (труб) из заэвтектических силуминовых сплавов 01390, 01391, 01392.

Проведен анализ классических калибровок и профиля прошивных оправок, применяемых в металлургии (черной и цветной) и обоснован выбор сферической оправки, основное отличие которой заключается в отсутствии цилиндрического носка, с заменой его на конический, с плавным сферическим переходом от него к обжимной и калибрующей частям оправки.

Предложенная калибровка прошивной оправки снижает лобовое давление металла заготовки на оправку, а значит, уменьшает осевое давление на стержень оправки и изгибающий момент, т.е. повышает устойчивость стержня оправки.

Предлагаемая калибровка прошивной оправки устраняет появление "застойных" зон прошиваемого металла в зоне цилиндрического носка, повышает "обтекаемость" металла относительно оправки, улучшает условия естественного течения прошиваемого металла в очаге деформации вдоль рабочей обжимной части оправки.

Применялись предложенные оправки со сферической калибровкой и коническим носком с отношением длины рабочей части $L_{\text{раб}}$ оправки к ее диаметру, равной $L_{\text{раб}}/d_0 = 2,1$.

В целях устранения полного налипания прошиваемого металла на поверхность прошивной оправки, предложено и реализовано покрытие оправки диоксидом циркония, вместо часто применяемого процесса хромирования.

Применение покрытия поверхности прошиваемой оправки диоксидом циркония полностью исключает налипание прошиваемого металла на оправку.

Выполнен расчет основных настроечных параметров прошивки гильз из заэвтектических силуминовых сплавов, в основу которого были взяты схема очага деформации и основные размеры рабочего валька.

Согласно расчетам выдвижение оправки за пережим рабочих валков равно 40 мм, а диаметр заготовки в пережиме валков, равный $2r_n = 70$ мм.

Разностенность получаемых гильз ($\varnothing 75 \times 8$, $\varnothing 80 \times 15$, $\varnothing 80 \times 13,5$, $\varnothing 70 \times 7$, $\varnothing 75 \times 5$ мм) длиной $2 \div 2,5$ м не превышает 0,2 мм на концах гильзы, что составляет < 1,0 % и значительно меньше разностенности гильз, прошиваемых в черной металлургии с применением двухвалковой схемы прошивки и равной 3-7 %. Наружная и внутренняя поверхность гильз также отличается высоким качеством.

Особенностями процесса прошивки гильз из заэвтектических силуминов является следующее:

- невозможность осуществления процесса прошивки гильз непосредственно из слитков;

- необходимость промежуточного процесса прокатки сплошных цилиндрических слитков из этих сплавов с применением только трехвалковой схемы ПВП, нагрева слитков в узком диапазоне температур $T^{\circ}\text{C} = 470 \div 480^{\circ}\text{C}$, с углом подачи $\alpha = 9^{\circ}$, частотой вращения рабочих валков не более $36 \div 40$ об/мин, при соотношении диаметра рабочих валков к диаметру заготовки не менее $i \geq 3$;

- прошивка гильз из заэвтектических силуминовых сплавов возможна только из предварительно прокатанных прутков, при этом угол подачи при прошивке равен $\alpha = 6^{\circ}$, частота вращения рабочих валков не более 30 об/мин, с нагревом заготовки для прошивки в пределах $T^{\circ}\text{C} = 470 \div 480^{\circ}\text{C}$, с применением как двух-, так и трехвалковой схем прошивки;

- прошивка гильз из заэвтектических силуминовых сплавов реализуется с применением оправок со сферической калибровкой и с коническим носком. при этом в качестве надежного покрытия поверхности оправки от налипания прошиваемого металла был применен диоксид циркония, а в качестве смазки прошивных оправок использован коллоидальный графит.

Получаемые (впервые в практике) гильзы из заэвтектических силуминов отличаются высокими показателями качества как наружной, так и внутренней поверхностей, очень малой разностенностью.

ГЛАВА 6. Факторы, определяющие механизм структурообразования и повышения пластических свойств заэвтектических силуминов при поперечно-винтовой прокатке

Рассмотрены и определены основные факторы, характеризующие механизм структурообразования и влияющие на повышение пластических свойств заэвтектических силуминовых сплавов при поперечно-винтовой прокатке. Выявлены причины, не позволяющие получить прирост пластических свойств этих сплавов при их обработке способом прессования.

Первая серия проведенных экспериментов заключалась в определении минимально возможных размеров кристаллов кремния (4), которые могут быть достигнуты при прессовании, в сравнении с процессом ПВП, а также выявлении зависимости этих минимально возможных размеров кристаллов кремния от степени деформации (ε) при этих процессах. Для чистоты эксперимента заготовки вырезались из одного слитка, т.е. из одной плавки с одним и тем же исходным максимальным (средним) размером кристаллов кремния, равным $A_0 \geq 40$ мкм.

Исследовано влияние способов ОМД (прессование и ПВП), а также степени деформации (ε %) на достижение минимально возможных размеров кристаллов кремния (A) при обработке слитков $\varnothing 112$ мм и заэвтектического силумина 01390 этими способами показано на рис. 11.



Рис. 11 Диаграмма изменения средних размеров кристаллов первичного кремния в структуре слитка и прутков diam. 92-14 мм после ПВП и прессования с разной степенью деформации:

- 1 — слиток $\varnothing 112$ мм,
- 2 — пруток $\varnothing 92$ мм ($\varepsilon = 32\%$, $\mu = 1,5$),
- 3 — пруток $\varnothing 80$ мм ($\varepsilon = 49\%$, $\mu = 1,96$),
- 4 — пруток $\varnothing 60$ мм ($\varepsilon = 71\%$, $\mu = 3,5$),
- 5 — пруток $\varnothing 50$ мм ($\varepsilon = 81\%$, $\mu = 5,0$),
- 6 — пруток $\varnothing 14$ мм ($\varepsilon = 98\%$, $\mu = 64,0$),
- 7 — пруток $\varnothing 40$ мм — прессование ($\varepsilon = 87,2\%$, $\mu = 5,7$)

Экспериментально установлено: при прессовании даже при больших степенях деформации ($\varepsilon = 87,2\%$) измельчение кристаллов кремния практически не происходит, т.е. средний (минимально возможный) размер кристаллов кремния составляет 35÷37 мкм и почти не отличается от размеров кристаллов кремния в исходных слитках, равных $A_0 \geq 40$ мкм.

При ПВП этот размер кристаллов кремния ($A = 35$ мкм) достигается при значительно меньших степенях деформации ($\varepsilon = 32\%$), т.е. при прокатке прутка $\varnothing 92$ мм. С увеличением степени деформации до $\varepsilon = 49\%$ ($\varnothing 80$ мм), размер кристаллов кремния уменьшается до 10-15 мкм, и этот размер кристаллов кремния в дальнейшем не уменьшается при любых значениях (ε) свыше 50% (рис. 13).

Кристаллы кремния по-разному реагируют на сжатие и растяжение. Предел прочности литого кремния при сжатии равен $\sigma_s = -471$ МПа ($T^0C = 500^0C$), а при растяжении — всего лишь $\sigma_s = 16,7$ МПа.

Экспериментально установлено, что при прессовании заэвтектических силуминов (слитка $\varnothing 112$ мм) на горизонтально-гидравлическом прессе с максималь-

ным усилием прессования $P = 750 \text{ ТН}$, процесс пластического деформирования начинался и заканчивался при усилии пресса, равном $P = 170 \text{ ТН}$; что соответствует созданию уровня напряжений сжатия равным всего лишь $\sigma_{сж} = -240 \text{ МПа}$. Это в два раза меньше, чем требуется для разрушения (дробления) кристаллов кремния при сжатии.

Достигнутых величин сжатия ($\sigma_{сж} = -240 \text{ МПа}$) при прессовании слитков из заэвтектических силуминов оказывается достаточно только для деформирования эвтектики, имеющей высокие пластические характеристики. но крайне недостаточно для дробления кристаллов кремния, которые при прессовании, благодаря высокопластичной эвтектике, перемещаются из верхних слоев прессуемого слитка в центральные, приобретая большую плотность их расположения в сечении прутка и поэтому, практически не уменьшаются в своих размерах (табл. 5).

При прессовании, в связи с малой длиной очага деформации (толщина матрицы), каждая частица или поперечное сечение заготовки подвергается только одностороннему деформационному воздействию, что также отрицательно сказывается на дроблении кристаллов и получение мелкозернистой структуры прессуемых изделий.

Таблица 5

Влияние способов ОМД и степени деформации на средние размеры, количество и плотность кристаллов кремния в структуре слитка и прутков из заэвтектического силумина 01390

Тип полуфабриката	Диаметр, мм	Способ ОМД	Степень деформации, %	Средний размер Si, мкм	Количество (n) на поле 0,65x0,65 мм	Плотность (количество) кристаллов Si в сечении шлифа, n/мм ²
Слиток	112	-	-	40	40	94,6
Пруток	92	ПВП	32	35	64	151,4
«»	80	«»	50	15	234	553,8
«»	52	«»	78	15	234	553,8
«»	14	«»	98	15	234	553,8
Пруток	40	Гор.пресс.	87,2	35	64	151,4

При ПВП (трехвалковая схема) величины всех нормальных (радиальных, окружных и осевых) растягивающих напряжений превышают предел прочности кремния на растяжение, равного $\sigma_e = 16 \text{ МПа}$, а порядок величин (даже раздельного воздействия) каждого вида нормальных напряжений сжатия также очень близок к величине предела прочности кремния на сжатие.

Таким образом, в отличие от процесса прессования, процесс дробления кристаллов кремния при ПВП (трехвалковая схема) реализуется благодаря одновременному воздействию как растягивающих, так и напряжений сжатия. Каждое из этих воздействий достаточно эффективно само по себе, а суммарное их воздействие (даже при небольших степенях деформации ($\varepsilon = 32 \%$)) делает процесс ПВП незаменимым для достижения мелкозернистой структуры прутков, получаемых этим способом.

Полученные результаты дисперсности кристаллов кремния кардинально отличаются друг от друга – при прессовании они практически не дробятся, а при ПВП уменьшаются до 10-15 мкм. Из этого можно сделать вывод, что наличие только

схемы всестороннего сжатия (при прессовании) не всегда обеспечивает получение необходимой мелкозернистой структуры.

Наличие напряжений (растягивающих и сжатия), т.е. различной знаковой направленности в различных зонах сечения заготовки является не единственным отличительным фактором, положительно влияющим на степень дробления кристаллов кремния и получения мелкозернистой структуры при ПВП. Не менее, а может и более важным фактором и главной отличительной особенностью ПВП от процесса прессования является кинематика данного процесса.

При ПВП каждая частица металла и их совокупность приобретают винтовую (геликоидальную) траекторию, имеющую свои характеристики: угол подъема (или наклона) винтовой линии к горизонтальной (оси заготовки) оси – φ и шаг винтовой линии – $S_{\text{пов.}}$. Эти два параметра напрямую зависят от угла подачи (α) и степени деформации (ε).

Уменьшение угла подачи с увеличением степени деформации приводит к уменьшению шага винтовой линии на поверхности прутков $S_{\text{пов.}}$, к увеличению числа оборотов заготовки в пределах длины очага деформации, т.е. к увеличению числа циклических воздействий рабочих валков на заготовку, что также увеличивает степень дробления кристаллов кремния в заготовке.

В отличие от процесса прессования, являющимся одноциклическим процессом, при ПВП, помимо процесса дробления кристаллов кремния, реализуемого от воздействия напряжений растяжения и сжатия, возникающих в заготовке, степень дробления кристаллов кремния усиливается и многоциклическостью, т.е. кинематикой этого процесса.

Установлено, что одинаковые размеры кристаллов кремния ($A = 35 \text{ мкм}$) и, в целом, одинаковая степень измельчения структуры полученных прутков различными способами (прессование и ПВП) приводит к различным результатам: при прессовании – к увеличению относительного удлинения δ % всего лишь на 0,3 % в сравнении со слитками (с 3,2 до 3,5 %), а после ПВП – к увеличению δ % почти в три раза (с $\delta = 3,2$ % в слитке до $\delta = 9$ % в прутках Ø92).

Помимо получения мелкозернистой структуры, важнейшую роль в повышении пластических свойств материалов играет и способ получения этой структуры (в данном случае – ПВП).

Для более полного изучения процесса ПВП проведены эксперименты для определения послойных траекторий движения металла (спл. 01390) с применением продольных алюминиевых (или других металлов) штифтов, установленных на разных радиусах и в центре заготовки (рис. 12).

Установлено, что измельченная структура каждого, бесконечно малого по толщине слоя прокатанного прутка способом ПВП, характеризуется своим ориентированием, свойственным только этому (одному) слою, со своим углом наклона винтовых линий течения металла, при этом, длина винтовых линий в каждом слое заготовки зависит от угла подачи (α), степени деформации (ε) и радиуса R_x того или иного слоя прокатанного прутка и уменьшается от поверхностного слоя, где она максимальная (в нашем случае $\ell_{R0} = 13874 \text{ мм}$) к центру заготовки с промежуточными значениями ($\ell_{R1} = 2842,6 \text{ мм}$, $\ell_{R2} = 2320,4 \text{ мм}$ и $\ell_{R3} = 2007 \text{ мм}$), т.е. уменьшается с уменьшением радиуса исследуемого слоя.

Установлено, что сочетание всех слоев прутка, в каждом из которых измельченная структура ориентирована по своему закону траектории с параметрами (φ и $S_{R\alpha}$),

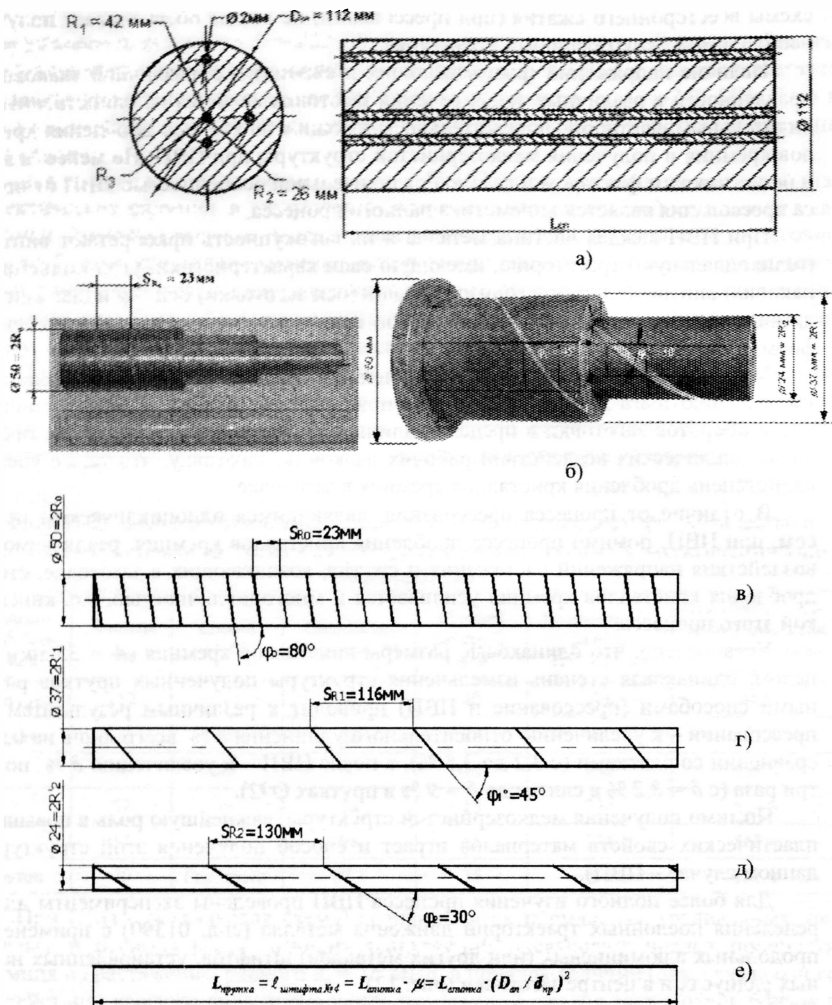


Рис. 12 Траектории движения металла (спл. 01390) по слоям после поперечно-винтовой прокатки слитка со штифтами в пруток (с $\varnothing 112 \text{ мм}$ на $\varnothing 50 \text{ мм}$):

а – исходный образец (слиток со штифтами) до ПВП;

б – пруток после ПВП и снятия металла до появления штифтов;

в – параметры траектории винтовой линии на поверхности прокатанного прутка $\varnothing 50 \text{ мм}$ (с радиусом R_0);

г – параметры траектории винтовой линии в слое R_1 после прокатки (штифт №1);

д – параметры траектории винтовой линии в слое R_2 после прокатки (штифт №2);

е – штифт № 4 в центре заготовки

свойственными только одному слою и обеспечивает всему объему прокатанного прутка (полуфабрикат) методом ПВП, резкий прирост пластических свойств.

Экспериментально доказано, что при ПВП не происходит перемешивания концентрических слоев металла в радиальном направлении. Это подтверждается тем, что наиболее удаленные от геометрической оси встроенные штифты и после ПВП остаются также наиболее удаленными, а самые близкие к оси – такими же и после ПВП (рис. 12 и рис. 13).

Установлено, что концентрические слои заготовки, находящиеся на больших расстояниях от оси заготовки, при ПВП подвержены закручиванию в большей степени, чем слои, находящиеся вблизи оси заготовки (рис. 13).

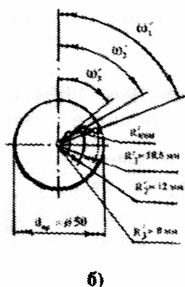
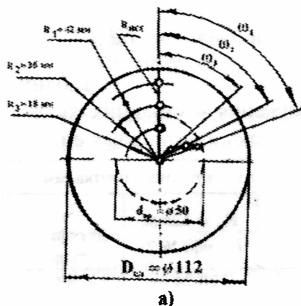


Рис. 13 Схема перемещения в поперечном сечении заготовки-прутка из заэвтектических сплавов продольных контрольных штифтов при ПВП (трехвалковая схема):

- а) положение штифтов в исходном слитке Ø 112 мм;
- б) положение штифтов в прутке Ø 50 мм после ПВП

Разработана математическая модель зависимости перемещения металла на поверхности прокатываемого прутка от угла подачи (α) и степени деформации (ϵ), т.е. $S_{\text{пов}} = f_1(\alpha, \epsilon)$:

$$S_{\text{пов}} = f(\alpha, \epsilon) = S_{\text{пов}} = \pi \cdot d_{\text{пр}} \cdot \text{tg} \alpha \{1 - \alpha \cdot [0,02888 - 0,2316(\epsilon - 0,548)^2]\}, \quad (1)$$

Выполнены аналитические исследования кинематики движения внутренних слоев металла при ПВП заэвтектических силуминов и предложена математическая модель перемещения этих слоев.

Для определения шага винтовых линий перемещения металла внутри заготовки (прутка) при ПВП предложена модель функции

$$S_{\text{ин}} = f(\alpha, \epsilon, R'_x)$$

Предварительные эксперименты показали, что функцию $S_{\text{ин}} = f(\alpha, \epsilon, R'_x)$ можно представить как $S_{\text{ин}} = S_{\text{пов}} \cdot f_1(R'_x)$, где:

R'_x - радиус того или иного слоя прокатанного прутка.

Функцию $f_1(R'_x)$ можно представить зависимостью вида:

$$f_1(R'_x) = D - E \cdot \left(\frac{R'_x}{R_{\text{пр}}} \right)^F, \quad (2)$$

где: $R_{\text{пр}}$ - наружный радиус прокатанного прутка;

R'_x - радиус концентрического слоя металла внутри прокатанного прутка;

D, E, F - постоянные, которые определены на основе экспериментальных данных (табл. 6): $D = 5,9467$; $E = 4,9467$; $F = 6,62$.

Таким образом:

$$S_{\text{внх}} = S_{\text{пов}} \cdot \left[5,9467 - 4,9467 \left(\frac{R'_x}{R_{\text{пр}}} \right)^{6,62} \right] \quad (3)$$

или в развернутом виде:

$$S_{\text{внх}} = f(\alpha, \varepsilon, R'_x) = \pi \cdot d_{\text{пр}} \cdot \text{tg} \alpha \left[1 - \alpha \cdot [0,02888 - 0,2316(\varepsilon - 0,548)^2] \right] \cdot \left[5,9467 - 4,9467 \left(\frac{R'_x}{R_{\text{пр}}} \right)^{6,62} \right] \quad (4)$$

Угол наклона винтовых линий перемещения металла внутри прутка определяется

$$\varphi_{\text{внх}} = \arctg \frac{2\pi R'_x}{S_{\text{внх}}} \quad (5)$$

Сравнение экспериментальных и расчетных данных приведено в табл. 6.

Таблица 6

Сравнительная таблица параметров кинематики движения внутренних слоев металла $s_{\text{вн}}$, $\ell_{\text{вн}}$, $\varphi_{\text{вн}}$ при ПВП образцов из заэвтектических силуминовых сплавов

Параметры винтовых линий перемещения металла внутри образца со штифтами		Радиусы концентрических слоев прокатанного прутка, мм			
		$R_{\text{пр}} = R'_1 = 25\text{мм}$ (поверхность прутка)	$R'_2 = 18,5\text{мм}$ (штифт № 1)	$R'_3 = 12\text{мм}$ (штифт № 2)	$R'_4 = 0$ (штифт № 3) (ось прутка)
Шаг винтовой линии $S_{\text{вн}}$, мм	Расчет	21,7056	114,448	128,2436	129,0767
	Эксперимент	22	116	130	-
Длина винтовой линии на одном шаге - $\ell_{\text{вн}}$, мм	Расчет	158,5722	163,125	148,766	129,0767
	Эксперимент	160	164	150	-
Угол наклона винтовой линии к оси прутка - $\varphi_{\text{вн}}$, град	Расчет	82,1326	45,4448	30,4525	0
	Эксперимент	80	45	30	0

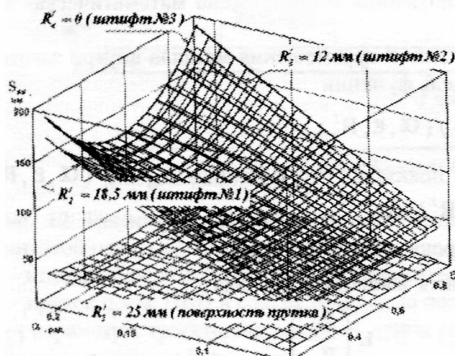


Рис. 14 Пространственная диаграмма функции $s_{\text{вн}} = f(\alpha, \varepsilon, R'_x)$, т.е. зависимость шага $S_{\text{вн}}$ винтовой линии перемещения внутренних слоев металла от угла подачи α , степени деформации ε концентрических слоев различного радиуса R'_x .

Разработана математическая модель зависимости размеров кристаллов кремния, получаемых в прутках заэвтектических силуминов после ПВП от параметров этого процесса.

Так как количество циклов воздействия рабочих валков на заготовку на длине очага деформации связано с параметрами процесса ПВП (ε и α), т.е. $N_{\text{ц.у.}} = f(\varepsilon, \alpha)$,

то очевидно, что средний размер кристаллов кремния для 01390, 01391, 01392 взаимосвязан с этими параметрами. В соответствии с этим и в результате математической обработки экспериментальных данных предложена следующая модель функции $A = f(N_{и,у})$

или в общем виде:

$$A = A_0 \cdot e^{-N_{и,у}/B}, \quad (6)$$

где: A_0 – размер исходного зерна (кристаллов кремния) до обработки ПВП;

A – размер среднего зерна (кристаллов кремния) после ПВП;

e – 2,73 – основание натурального логарифма;

B – постоянная, характеризующая интенсивность дробления зерен (кристаллов кремния) или, другими словами, степень изменения среднего размера зерен (кристаллов кремния), отнесенное к единичному акту воздействия рабочих валков на заготовку.

В основном, B зависит от материала заготовки, его структуры и, в определенном диапазоне температуры, остается неизменной величиной.

Постоянная B легко определяется по результатам эксперимента и с помощью уравнения функции $A = f(N_{и,у})$:

$$B = N_{и,у} / \ln \frac{A_0}{A}, \quad (7)$$

где A , A_0 и $N_{и,у}$ – экспериментальные данные.

График функции $A = A_0 \cdot e^{-N_{и,у}/B}$ имеет вид (рис. 15), который очень близок к экспериментально полученным графикам (рис. 6 и рис. 11).

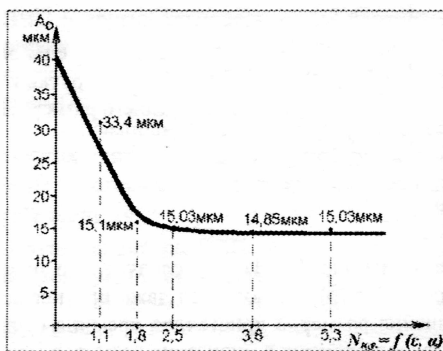


Рис. 15 Общий вид графика функции

$$A = A_0 \cdot e^{-N_{и,у}/B}$$

Разработана математическая модель зависимости пластических свойств заэвтектических силуминовых сплавов от изменения размеров кристаллов кремния при ПВП заготовки в прутки.

Экспериментально установлено, что ПВП слитков из заэвтектических силуминов (01390, 01391, 01392) кардинально измельчает структуру сплавов, в том числе обеспечивает максимальное измельчение кристаллов кремния, способствует снижению их среднего размера и, как следствие этого, повышает пластические свойства прутков.

Пластические свойства прутков оцениваются через показатель δ % – относительное удлинение. Зависимость δ % от размеров кристаллов кремния A при ПВП носит сложный характер.

Функция $\delta = f(A)$ аппроксимируется уравнением экспоненциального вида

$$\delta = M \cdot \left(1 - e^{-\frac{A-H}{P}} \right), \quad (8)$$

где: e – основание натурального логарифма, равное 2,73;

A – средний размер кристаллов кремния в мкм;

M, H, P – постоянные, которые определяются посредством экспериментальных данных (табл. 7): $M = 11,01$; $H = 41,265$; $P = 3,684$.

После подстановки значений M, H, P получим:

$$\delta = 11,01 \cdot \left(1 - e^{-\frac{A-41,265}{3,684}} \right) \quad (9)$$

Таблица 7

Сравнительные характеристики заэвтектического силуминового сплава 01390 в разных состояниях

Состояние образца	Средний размер кристаллов кремния мкм (А)	Относительное удлинение δ %	Степень деформации ε %
Слиток $\varnothing$ 112 мм	40	3,2	-
Пруток горячекатаный ПВП $\varnothing$ 92 мм	35	9,0	32
Пруток горячекатаный ПВП $\varnothing$ 80 мм	15	11,0	49

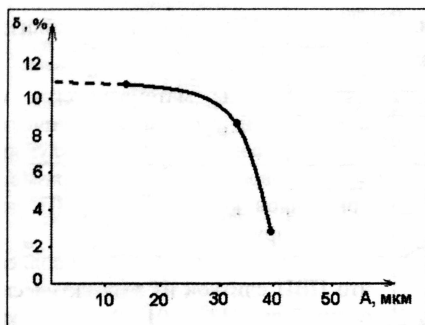


Рис. 16 Зависимость относительного удлинения δ прокатанных прутков (01390, 01391) от среднего размера A кристаллов кремния

График зависимости $\delta = f(A)$ показан на рис. 16. Из него следует, что значительное повышение относительного удлинения (δ) наблюдается даже при невысокой степени деформации, когда уменьшение размеров кристаллов кремния составило всего 5 мкм. При дроблении кристаллов кремния в диапазоне размеров менее 20 мкм степень изменения пластичности в сторону увеличения малозаметна и с размеров $A \approx 15 \div 10$ мкм практически остается неизменной, достигая максимального значения на уровне $\delta = 11,4$ %.

График, построенный согласно предложенной формуле (9) отображает реальное поведение прокатываемых заэвтектических силуминовых сплавов (рис. 16). Полученные результаты настоящей работы, а также результаты работ, выполненных проф. Б.А. Романцевым (МИСиС), при исследовании технологических возможностей высокопрочных чугунов, изучению структуры и свойств их в результате деформирования методом ПВП, подтверждают правильность выбранного направления и универсальность применения метода ПВП для повышения эксплуатационных свойств малопластичных труднодеформируемых металлов, как цветных, так и черных металлов, имеющих многофазовую исходную структуру.

Основные выводы по работе.

1. С целью значительного расширения технологических и эксплуатационных возможностей литейных, по своей сути, малопластичных заэвтектических силуминов (с содержанием $\text{Si} \geq 17\div 23\%$), имеющих особые физико-механические свойства, но, вследствие низких их пластических свойств, имеющих ограниченное применение (в основном, фасонное литье), впервые реализовано многократное (почти в 4 раза) повышение их пластических свойств без снижения прочностных свойств.

2. Для реализации задачи превращения малопластичных и, поэтому, труднодеформируемых заэвтектических силуминов в пластически деформируемые, в качестве основного способа ОМД рекомендуется процесс поперечно-винтовой прокатки (ПВП) с применением 3-х валковой схемы.

3. Выполнение теоретических, технологических и экспериментальных исследований, направленных на повышение пластических свойств заэвтектических силуминов стало возможным благодаря созданию универсального стана ПВП 20-60, конструктивные основы и признаки универсальности которого были разработаны автором настоящей работы, а рабочий проект и изготовление в металле выполнены КБ косой прокатки и ЭЗТМ для ЗЛС ВИЛСа (все варианты рабочей клетки защищены авторскими свидетельствами).

4. Впервые выполнено трехмерное конечно-элементное моделирование процесса ПВП сплошной заготовки и дан сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния прокатываемой заготовки при различных схемах ПВП (двух-, трех- и четырехвалковая), на основе которого обоснован выбор схемы ПВП и других технологических параметров этого процесса (угол подачи, степень деформации, скорость прокатки и т.д.), подтвердивших принципиальную возможность пластического деформирования малопластичных заэвтектических силуминов способом ПВП.

5. Выполнен комплекс исследований реологических свойств и структуры исходных слитков из заэвтектических силуминов на растяжение и кручение. результаты которых позволили определить температурно-скоростной диапазон ($T^{\circ}\text{C}=470\div 480^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon} = 0,3\div 0,5 \text{ c}^{-1}$) горячего деформирования слитков в прутки и другие параметры ПВП, при которых указанные сплавы приобретают максимально возможную пластичность.

6. Впервые получены полуфабрикаты (прутки) из слитков заэвтектических силуминов (01390, 01391, 01392) методом ПВП с использованием трехвалковой схемы прокатки, пластические свойства которых (δ и ψ %) в 2,5÷3,5 раз превышают пластические свойства исходных слитков с измельченными кристаллами кремния до 15÷10 мкм в прутках благодаря многократному циклическому деформированию при ПВП со степенью деформации $\epsilon \geq 32\%$.

7. Для изучения особенностей воздействия ПВП на структуру и свойства заэвтектических силуминов выполнен комплекс металлографических исследований, включающий изучение фазового состава, морфологии и размеров частиц различных фаз.

8. Изучены и определены основные технологические факторы, характеризующие механизм структурообразования и повышения пластических свойств заэвтектических силуминов при ПВП, в т.ч.:

- степень влияния различных способов ОМД (прессование и ПВП) на структуру и пластические свойства полученных полуфабрикатов, влияние различных схем напряженно-деформированного состояния и кинематических параметров ПВП на процесс дробления кристаллов кремния и структурообразования заэвтектических силуминов при ПВП;

- установлена зависимость дисперсности (размеров) кристаллов кремния от основных параметров процесса ПВП (угол подачи α , степень деформации ϵ , число циклов воздействия рабочих валков на заготовку).

9. Выполнены экспериментальные и аналитические исследования кинематики деформирования заготовки способом ПВП, определены основные параметры геликоидального движения внутренних слоев заготовки (шаг винтовых линий - S_x , угол наклона винтовых линий течения металла к оси заготовки φ) в зависимости от радиуса этих слоев, угла подачи и степени деформации.

10. Впервые на универсальном стане ПВП 20-60 разработана и освоена технология прошивки гильз из предварительно прокатанных прутков заэвтектических силуминов (01390, 01392).

На технологию прокатки прутков и труб из заэвтектических силуминовых сплавов получен патент РФ на изобретение.

11. Возможность широкого использования полуфабрикатов, полученных методом ПВП для последующей обработки другими способами ОМД доказана еще и тем, что на кафедре СПД МГТУ «Станкин» была освоена технология горячей объемной штамповки деталей сложной конфигурации типа «чашка» и «диск» для автомобиля ВАЗ 32118 из заэвтектического силуминового сплава 01392.

Изготовлены опытно-промышленные партии катаных прутков $\varnothing 80\pm 90$ мм различных сплавов для получения из них методом изотермической штамповки поршней с повышенной износостойкостью для двигателей в авиа- и автомобилестроении.

12. Результаты выполненной работы открывают перспективу широкого применения в промышленности заэвтектических силуминов с применением высокопроизводительных методов ОМД вместо трудоемких литейных технологий.

Основное содержание диссертации отражено в публикациях:

1. Авт. свидетельство № 341544 (СССР). МКИ В21в 19/00. Клеть косовалкового стана. Приоритет от 24 ноября 1970 г. / Белов А.Ф., Панов Е.И. и др. // Б.И. - 1972. - № 25.

2. Авт. свидетельство № 348250 (СССР). МКИ В21в 19/00. Рабочая клеть трубопрокатного стана. Приоритет от 17 февраля 1971 г. / Панов Е.И. и др. // Б.И. - 1972. - № 25.

3. Трехмерное конечно-элементное моделирование процесса поперечно-винтовой прокатки сплошной заготовки / Е.И. Панов, А.А. Восканьянц, А.В. Иванов, В.М. Лушников, О.Ю. Ильин // Технология легких сплавов. -2001. -№5-6. - С.54-59.

4. Получение прутков повышенного качества из заэвтектических силуминов поперечно-винтовой прокатки / Е.И. Панов, Г.И. Эскин, А.А. Восканьянц, О.Ю. Ильин // Металлург. -2002. -№8. -С.43-44.

5. Эскин Г.И., Панов Е.И. Влияние поперечно-винтовой прокатки на структуру и свойства заэвтектических силуминов разной шихтовой основы // Цветные металлы. -2002. -№9. -С.85-89.

6. Панов Е.И., Осадчий В.Я. Напряженно-деформированное состояние металла при двух- и трехвалковой схемах поперечно-винтовой прокатки // Труды пятого конгресса прокатчиков. -Череповец, 2003. -С.320-334.
7. Панов Е.И., Эскин Г.И., Коньков А.О. Производство прутков из труднодеформируемого силуминового сплава 01390 на универсальном стане поперечно-винтовой прокатки // Труды пятого конгресса прокатчиков. -Череповец, 2003. -С.334-338.
8. Панов Е.И. Некоторые аспекты напряженно-деформированного состояния заготовки при поперечно-винтовой прокатке // Металлург. -2003. -№12. -С.34-38.
9. Панов Е.И. Поперечно-винтовая прокатка сплошной заготовки: радиальные напряжения // Металлург. -2004. -№1. -С.33-40.
10. Панов Е.И. Зависимость радиальных напряжений, возникающих в заготовке от схем поперечно-винтовой прокатки и усилия натяжения // Металлург. -2004. -№2. -С.32-39.
11. Панов Е.И. Влияние подпора и натяжения на радиальные напряжения при поперечно-винтовой прокатке // Металлург. -2004. -№4. -С.50-57.
12. Панов Е.И., Эскин Г.И. Поперечно-винтовая прокатка заэвтектических силуминов: реология, структура, свойства // Национальная металлургия. -2004. -№3. -С.83-89.
13. Панов Е.И., Осадчий В.Я. Особенности технологического процесса производства прутков и бесшовных труб методом поперечно-винтовой прокатки из труднодеформируемых заэвтектических силуминовых сплавов 01390 и 01391 // Непрерывные процессы обработки давлением: Труды Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения акад. А.И. Целикова. -Москва, 2004. -С.83-84.
14. Панов Е.И. Повышение пластических свойств заэвтектических силуминовых труднодеформированных сплавов 01390, 01391 методом поперечно-винтовой прокатки // Металлург. -2004. -№6. -С.66-69.
15. Панов Е.И., Эскин Г.И. Исследование реологических свойств труднодеформируемого силумина марки 01390 при растяжении с целью оптимизации параметров поперечно-винтовой прокатки // Цветные металлы. -2004. -№6. -С.48-53.
16. Панов Е.И. Напряженно-деформированное состояние при поперечно-винтовой прокатке // Металлург. -2004. -№7. -С.49-53.
17. Панов Е.И. Влияние усилий подпора и натяжения на осевые напряжения при поперечно-винтовой прокатке // Металлург. -2004. -№8. -С.59-64.
18. Панов Е.И., Эскин Г.И. Влияние поперечно-винтовой прокатки на структуру и свойства заэвтектических силуминов // Металловедение и термическая обработка металлов (МИТОМ). -2004. -№9. -С.7-13.
19. Технологические возможности заэвтектических силуминов в производстве деталей машиностроения // А.Э. Артес, Е.И. Панов, Г.И. Эскин, О.Ю. Ильин // Системы пластического деформирования материалов: Сборник научных трудов МГТУ "Станкин". -М., 2004. -Выпуск 10. -С.30-33.
20. Особенности структуры прутков из заэвтектического силумина марки 01390, полученных методом поперечно-винтовой прокатки / Е.И. Панов, Г.И. Эскин, Л.Б. Бер, Л.Г. Климович // Технология легких сплавов. -2004. -№5. -С.43-49.
21. Панов Е.И. Влияние технологических параметров поперечно-винтовой прокатки на величину окружных напряжений, возникающих в сплошной заготовке // Металлург. -2005. -№3. -С.47-52.

22. Панов Е.И. Окружные напряжения при поперечно-винтовой прокатке с осевым подпором // Технология легких сплавов. -2005. -№1-4. -С.150-156.
23. Панов Е.И. Касательные напряжения и их зависимость от различных технологических параметров при поперечно-винтовой прокатке сплошных заготовок // Металлург. -2005. -№7. -С.45-54.
24. Справочник по конструкционным материалам. Справочник / Б.Н. Арзамасов, Т.В. Соловьева, С.А. Герасимов, Г.И. Эскин, Е.И. Панов и др. // Под редакцией Б.Н. Арзамасова, Т.В. Соловьевой. -М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. -640 с., ил.
25. Исследование реологических свойств алюминиевого сплава 01390 в условиях прокатки на стане ПВП 20-60 / Е.И. Панов А.О. Коньков, А.М. Галкин, Г.И. Эскин // Заводская лаборатория. -2005. -№10. -Т.71. -С.57-58.
26. Патент № 2262997 (РФ). Способ производства полуфабрикатов из заэвтектических силуминов: приоритет от 25 августа 2004 г. Панов Е.И., Эскин Г.И., Ильин О.Ю., Осадчий В.Я. // Б.И. -2005. -№30.
27. Панов Е.И., Осадчий В.Я. Исследование напряженно-деформированного состояния металла при поперечно-винтовой прокатке методом трехмерного конечно-элементного моделирования // Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов: Труды международной научно-технической конференции, посвященной 90-летию со дня рождения чл.-корр. АН СССР В.С. Смирнова, -СПб., 2004. -С.95-99.
28. Никулин А.Н., Панов Е.И., Осадчий В.Я. Особенности деформирования металла продольной и поперечно-винтовой прокатки // Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов: Труды международной научно-технической конференции, посвященной 90-летию со дня рождения чл.-корр. АН СССР В.С. Смирнова, -СПб., 2004. -С.381-386.
29. Панов Е.И. Исследование окружных напряжений при поперечно-винтовой прокатке с натяжением // Технология легких сплавов. -2006. -№1-2. -С.169-176.
30. Панов Е.И. Новое о механизме структурообразования и повышения пластичности заэвтектических силуминов в условиях поперечно-винтовой прокатки // В сб. "Перспективные технологии легких и специальных сплавов". -М.: Физматлит. -2006. -С.162-179.
31. Панов Е.И. Особенности прошивки гильз из заэвтектических сплавов на универсальном стане ПВП 20-60 // Металлург. -2006. -№2. -С.65-71.
32. Панов Е.И. Основные факторы, влияющие на механизм структурообразования и повышение пластических свойств заэвтектических силуминов при трехвалковой поперечно-винтовой прокатке // Металлург. -2006. -№4. -С.69-75.
33. Панов Е.И. Влияние основных параметров поперечно-винтовой прокатки на пластические свойства заэвтектических силуминовых сплавов // Металлург. -2006. -№5. -С.72-74.
34. Панов Е.И. Математическая модель перемещения слоев металла при поперечно-винтовой прокатке заготовки из заэвтектических силуминов // Металлург. -2006. -№6. -С.57-59.
35. Панов Е.И., Осадчий В.Я. Особенности формирования структуры малопластичных заэвтектических силуминов при поперечно-винтовой прокатке // Производство проката. -2006. -№7. -С.25-32.
36. Панов Е.И. Влияние кинематики процесса поперечно-винтовой прокатки на дисперсность структуры заэвтектических силуминов // Металлург. -2006. -№8. -С.68-72.